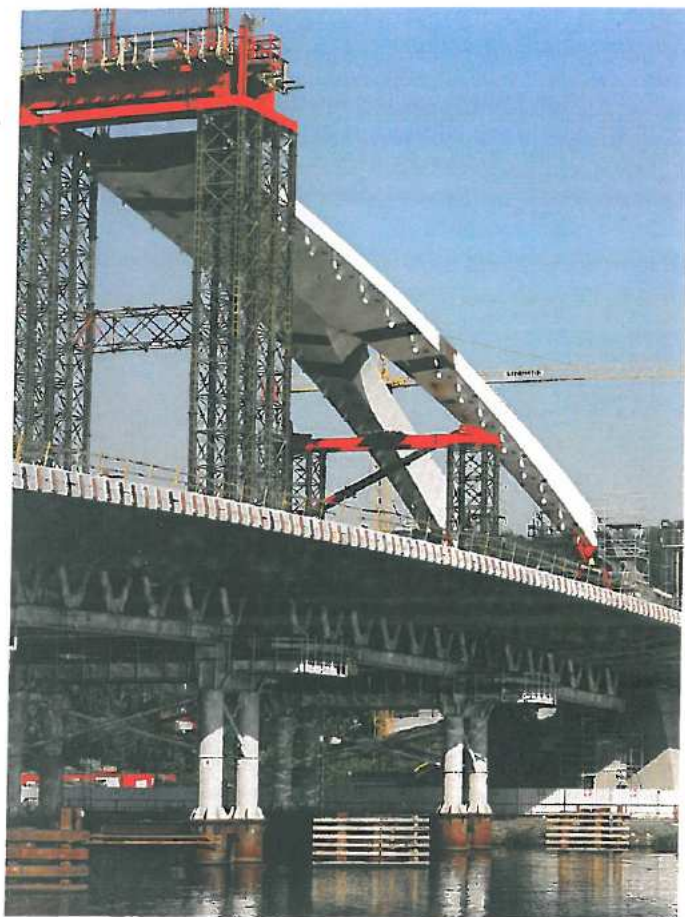




Ryc. 9. Wznoszenie skrajnej części tuku po stronie Troi

żyskach docelowych. Płyta pomostowa opadnie według założeń statycznych prawdopodobnie o 250 mm i w ten sposób dojdzie do pełnej aktywacji wszystkich wieszaków. Następnie zostanie zdemontowana pozostała część tymczasowej konstrukcji kratowej oraz nastąpi ostatnia faza sprężania podłużnego i kontrola sprężenia wieszaków. W przypadku ewentualnych odchyśleń od zakładanego napięcia wieszaki zostaną skalibrowane w optymalny sposób z wykorzystaniem metod programowania oraz matryc powiązanych. Oczekuje się, że rektyfikacja mogłaby dotyczyć ok. 10% wieszaków, po czym budowę mostu będzie można dokończyć. Zostaną zamontowane stalowe kapy chodnikowe, będzie położona wierzchnia warstwa jezdni, osadzone tory tramwajowe i oświetlenie itd.

Konstrukcje betonowe

Wszystkie konstrukcje betonowe są zaprojektowane z betonów wysokich klas dla zapewnienia wieloletniego użytkowania mostu. Poprzecznice są prefabrykowane z dodatkowo sprężonego betonu C70/85 XF2. Prefabrykaty nietypowych kształtów mają 29,28 m długości, 0,50 m szerokości i zmienną wysokość od 0,41 do 1,53 m, są sprężone dwoma dziewięciosplotowymi kablami systemu SUSPA-DSI (ryc. 11). Poprzecznice zostały wykonane w zakładzie produkcyjnym segmentów mostowych SMP CZ w Brandysie nad Labem. Sprężanie poprzecznic przebiegało w dwóch fazach, pierwsza faza miała miejsce jeszcze w zakładzie, druga po instalacji poprzecznic na ciągniku fuku przed wysuwaniem. Poprzecznice w trakcie transportu i montażu były narażone na szereg obciążeń, dlatego pełna akty-



Ryc. 10. Stan robót po wzniesieniu obu części skrajnej tuku

wacja sprężenia w zakładzie produkcyjnym była niemożliwa. Do poprzecznic zabetonowano stalowe elementy kotwiące, które przenoszą obciążenia z płyty pomostowej do cięgna łuku (ryc. 12). Elementy te zostały w zakładzie przymocowane za pomocą połączeń śrubowych do stalowej części cięgna łuku.

Konstrukcje monolityczne przęsła zalewowego i głównego przęsła mostu wykonano z betonu sprężonego C50/60 XF2, tylko cięgno łuku, ze względu na większe narażenie na sole rozmrzające, wykonano z betonu C50/60 XF4. Wszystkie betony konstrukcji monolitycznych zostały dostarczone przez firmę TBG Metrostav s.r.o. Kompletnie deskowanie konstrukcji monolitycznych mostu dostarczyła firma Česká Doka. Końcowe poprzecznic przęsła zalewowego i głównego stanowią masywną konstrukcję o wymiarach ok. 30 x 4 x 1,8 m. Z tego powodu przywiązywano nadzwyczajną wagę do wpływu ciepła hydratacyjnego na konstrukcję. Przy betonowaniu w miesiącach letnich (poprzecznic przęsła zalewowego) beton był chłodzony ciekłym azotem. W celu ograniczenia pęknięć powstających w początkowych fazach twardnienia betonu dodano do niego włókna polipropylenowe. Przęsło zalewowe ma ok. 1200 m³ objętości. Ze względu na złożoną formę konstrukcji oraz konieczność bardzo ostrożnego wylewania betonu konstrukcja przęsła zalewowego była betonowana w trzech częściach. Szczególną uwagę zwrócono na betonowanie cięgien mostu. Przestrzeń wewnątrz cięgna została wypełniona stalowymi elementami cięgna oraz zbrojeniem, które było przewidziane głównie dla ograniczenia pęknięć (ryc. 13). Idealne byłoby użycie do betonowania cięgna betonu samozagęszczającego, okazało się to jednak niemożliwe, ponieważ powierzchnia cięgna osiągała znaczne nachylenie – do 8%. Dlatego wyprodukowano specjalny beton, lekko gęstniejący, który umożliwił betonowanie elementów z nachyleniem powierzchni, a przy tym jest na tyle rzadki, że przeniknął przez małe otwory do niedostępnych części deskowania między gęsto ułożonym zbrojeniem. Technologia betonowania była przetestowana na modelowym wzorcu w skali 1:1, przy czym skontrolowano betonowanie wszystkich detali.

Beton wykorzystany przy wypełnianiu podstaw łuku został zaprojektowany na podstawie doświadczeń zdobytych przy opracowywaniu betonów wysoko wytrzymałościowych w firmie TBG Metrostav, s.r.o. Celem było osiągnięcie wysokiej wytrzymałości betonu (ostateczna projektowana klasa to C80/95), aby beton mógł w bezpieczny sposób przenieść wysokie obciążenia mechaniczne, powstające zwłaszcza w okolicy zakotwienia sześciu 37-splotowych kabli wchodzących w skład cięgna łuku. Wymagana była również zdolność betonu do całkowitego wypełnienia przestrzeni ograniczonej zbrojeniem konstrukcji. Skład betonu i sposób betonowania został znowu szczegółowo przetestowany na modelu konstrukcji w skali 1:1, który zrobiono ze sklejek. Przez wykonanie odwiertów potwierdzono jakość betonu i jego zdolność do wypełnienia całej wymaganej przestrzeni. Dopiero po pomyślnych wynikach testów przystąpiono do realizacji. Beton samozagęszczający został wpompowany do podstawy łuku od dołu, a całe podstawy wypełniano stopniowo w czterech etapach. Wyniki testów wykazały, że rzeczywista wytrzymałość betonu przekracza 100 MPa.

Sprężenie konstrukcji betonowych

Wszystkie betonowe konstrukcje nośne są sprężone, z wyjątkiem prefabrykowanych poprzecznic. Użyto w tym celu systemu



Ryc. 11. Walce hydrauliczne unoszące część łuku na prętach wieszakowych



Ryc. 12. Poprzecznic prefabrykowane na składzie



Ryc. 13. Element kotwiący przygotowany do zabetonowania w poprzecznic

sprężającego VSL. Poprzeczne sprężenie płyt przęsła głównego i zalewowego zapewniają kable czterospłotowe w płaskich kanałach. Cięgna sprężenia podłużnego są umieszczone w kanałach okrągłych i składają się z kabli różnych wielkości, od 7- do 37-splotowych. Największe 37-splotowe kable znajdują się w cięgniach łuku (w każdej parze cięgien jest sześć kabli). Most leży w pobliżu dworca kolejowego Holešovice, przy tunelach metra linii C i biegnie po nim linia tramwajowa. Z tego powodu jest mocno wyekspozowany na zjawisko prądów błędzących. Był to jeden



Ryc. 14. Ciężno łuku przed i po betonowaniu



Ryc. 15. Przekrój łuku w części środkowej

z powodów zaprojektowania sprzężenia z najwyższym stopniem zabezpieczeń. Wszystkie kable sprężające są zaprojektowane w stopniu zabezpieczeń PL3 (zgodnie z rekomendacją FIB), są więc umieszczone w plastikowych kanałach z izolacją elektryczną i monitorowane (umożliwia to pomiary odporności kiedykolwiek w trakcie żywotności konstrukcji). W ten sposób zapewniono maksymalną trwałość tego podstawowego systemu nośnego.

Konstrukcje stalowe

Budowa mostu wymagała wykonania konstrukcji stalowych zarówno docelowych, jak i tymczasowych. Konstrukcje tymczasowe obejmują zwłaszcza podpory tymczasowe w rzece oraz tymczasową konstrukcję kratową. Dalsze konstrukcje pomocnicze są już mniejsze, np. konstrukcje do wznoszenia łuku, wieże podporowe PIZMO, a to w ich części podporowej oraz w części platform górnych, konstrukcje pomocnicze sworzni do wznoszenia skrajnych elementów łuku, konstrukcje związane z wysuwaniem itd. Konstrukcje docelowe obejmują głównie łuk stalowy, ciężno łuku i wieszaki prętowe.

Podpory nurtowe o wymiarach 19 x 6,5 m są zaprojektowane jako ruszt stalowy, podparty czterema grubościennymi rurami o przekroju 1060 mm. Są one posadowione na palach wielkośrednicowych zakotwionych w podłożu nośnym. Po zakończeniu budowy ruty zostaną odcięte na głębokości 1 m pod dnem rzeki, ponieważ podpory tymczasowe muszą być kompletnie zdemontowane.

Tymczasowa konstrukcja kratowa złożona jest z pasa dolnego (profil I o wysokości 800 mm) oraz krzyżulców o średnicy

zewewnętrznej ok. 400 mm, grubość ścian jest zróżnicowana w zależności od obciążenia i wynosi od 12 mm do 40 mm. Córny pas konstrukcji kratowej jest jednocześnie konstrukcją stalową ciężna łuku.

Wieszak poprzeczny jest dość specyficzną konstrukcją stalową, zabetonowaną w poprzecznicę i przyśrubowaną do stalowego ciężna łuku. Przenosi obciążenie z płyty mostu do ciężna łuku i dalej do łuku. Dlatego stanowi on zasadniczą część konstrukcyjną mostu. Spawana konstrukcja jest wykonana z blach o grubości 25–70 mm z materiału S420 NL i S420 NL + Z 25. Kształt został dostosowany do funkcji statycznych i wymagań technologii montażu. Cały element o wymiarach 590 x 1368 x 1326 mm waży 1050 kg (ryc. 14).

Część stalowa ciężna łuku złożona jest z trzech głównych blach poziomych i dwóch pionowych. Roboczo element ten jest nazywany omega, z powodu swojego przekroju, zbliżonego kształtem do greckiej litery. Do usztywnień poprzecznych są przyśrubowane wieszaki poprzecznic oraz krzyżulce tymczasowej konstrukcji kratowej. Na powierzchni zewnętrznej do pionowych blach przyspawano zaczepy wieszaków. Omega składa się z blach o grubości od 25 mm do 90 mm z materiału S420 NL oraz S420 NL + Z25. Długość typowych elementów wynosi 16 m, a waga ok. 23 t. Elementy te były stopniowo spawane ze sobą na stanowisku montażowym przy wysuwaniu rusztu.

Łuk stalowy jest najbardziej złożoną konstrukcją stalową mostu. Pusty przekrój ma w najwyższej części łuku szerokość ok. 6,9 m i zmienną wysokość od 0,9 m do 1,3 m (ryc. 15). W kierunku podpór przekrój rozszerza się, aż do rozdzielienia na dwie niezależne części (mniej więcej w 1/4 rozpiętości), które są zakotwione przy podstawach łuku do końcowej poprzecznic betonowej. Łuk jest wzmocniony szeregiem usztywnień, cztery podłużne przenoszą obciążenia z zaczepów wieszaków do całego przekroju, pozostałe zapewniają sztywność konstrukcji. Grubość blachy górnej i dolnej wynosi 60 mm, grubość podłużnych ścian obwodowych 50 mm. Wewnętrzne usztywnienia podłużne mają tylko 40 mm grubości, a przegrody poprzeczne 25 mm. Do wykonania zaczepów wieszaków przy podstawach łuku użyto blach o grubości 80 mm. Do wykonania ścian i pasów łuku wykorzystano materiał S420 ML, podczas gdy pozostałe części powstały z materiału podstawowego S355 NL. Wszystkie połączenia tej złożonej konstrukcji są zaprojektowane tak, aby umożliwiały kontrolę spawów konstrukcyjnych.

Łuk został wykonany w Horních Počernicích (Metrostav) i w Slaném (MCE) w częściach o wadze 43 do 83 t. Były one następnie dostarczane na budowę i stopniowo spawane. Dalej podłużnie zespawane elementy zostały przesunięte na przyszły pas tramwajowy, gdzie zespawano je w trzy zestawy, które następnie wznoszono do pozycji docelowej.

Zabezpieczenia antykorozyjne

Do zabezpieczenia konstrukcji stalowych wykorzystano różnorodne systemy powłokowe ze względu na zagrożenie korozyjne według TP 84. Ogólnie systemy powłokowe można scharakteryzować jako kombinację powłoki podstawowej z wysoką zawartością cynku, dwóch powłok podkładowych oraz powłoki zewnętrznej w kolorze białym. W najbardziej narażonych miejscach zabezpieczenia antykorozyjne są wzmocnione kolejnymi warstwami, ewentualnie uzupełnione cynkowaniem żarowym.

Wieszaki

W sumie 200 wieszaków prętowych Macalloy, które tworzą sieć łuku, ma średnice w granicach 76–105 mm. Na obu końcach wieszaków (na łuku i ciągnię) zostały zamocowane przy pomocy widełek i sworzni. Pręty systemu Macalloy są wykonane z materiału S520. System spełnia wymagania bezpieczeństwa dotyczących skutków zmęczenia elementów. System został przetestowany próbami 2 mln cykli przy zróżnicowanym napięciu 130 MPa. Widełki i inne detale były zmodernizowane tak, aby odpowiadały wysokim wymaganiom dotyczącym zmęczenia materiału. Napinaniu wieszaków urządzeniami hydraulicznymi przymocowanymi na gwintach przy elemencie napinającym poświęcono najwięcej uwagi. Przygotowano system stopniowej rektyfikacji z wykorzystaniem metod programowania liniowego i matryc powiązanych w celu osiągnięcia sił wymaganych w projekcie w poszczególnych wieszakach, i to jak najszybszym sposobem.

Monitoring mostu

Oryginalny projekt konstrukcji wykorzystujący możliwości materiałów i złożony proces budowy wymagają kontroli wykonywanych czynności w celu sprawdzenia, czy konstrukcja jest wznoszona zgodnie z założeniami projektowymi. Dlatego też w trakcie realizacji inwestycji konstrukcja jest na bieżąco monitorowana zarówno pod względem geodezyjnym, jak i pomiarów deformacji konstrukcji mostu przy pomocy wbudowanych tensometrów. Kontrola geodezyjna była stosowana przy wysuwaniu oraz przy dokładnej kontroli położenia i kształtu wszystkich części mostu w trakcie montażu. Poza geodetami usługi monitoringu i pomiarów tensometrycznych świadczy również wyspecjalizowana firma. W ramach programu obserwacji w trakcie budowy wykonuje się pomiary deformacji na pomocniczej konstrukcji kratowej, w betonowym pomoście, w łuku i na wszystkich wieszakach. Długoterminowy program monitoringu mostu zakłada pomiary w pomoście, łuku i na wybranych wieszakach mostu.

Podsumowanie

Most Trojski jest jedną z najbardziej znaczących budowli ostatnich lat, a możliwe, że i jednym z ostatnich mostów przez Wełtawę, które powstaną w Pradze. Dlatego też zrozumiała jest decyzja inwestora, aby wybudować most oryginalny, który będzie budowlą przyciągającą uwagę. Już swoją rozpiętością różni się bardzo od pozostałych praskich mostów. Zespół wykonawczy wkłada najwięcej wysiłku w to, aby powstająca konstrukcja była bezpiecznie zaprojektowana i wzniesiona oraz by spełniała wymagania nowoczesnej konstrukcji inżynierskiej. Szczególna uwaga została poświęcona trwałości i długiej żywotności konstrukcji. Zastosowano innowacyjne, ale sprawdzone technologie i materiały. Poza właściwą konstrukcją nośną zadbane o funkcjonalność, jakość i wygląd pozostałych elementów mostu. Obecnie kończy się etap wznoszenia łuku mostu. Nawet laicy potrafią sobie już wyobrazić, jak będzie wyglądała ta budowla. Zakończenie budowy mostu jest przewidziane na jesień 2013 r., jednak normalne użytkowanie rozpocznie się dopiero po ukończeniu całego projektu Blanka w pierwszej połowie 2014 r.

Przy budowie mostu wykorzystano wiedzę uzyskaną przy opracowywaniu projektu MPO CR nr FR-TI3/531.

Podstawowe informacje o inwestycji

Autorzy: Jiří Petrák, Ladislav Šašek, Roman Koucký, Libor Kábrt
Projektant: Mott MacDonald CZ, s.r.o., Ladislav Šašek, Petr Nehasil

Projektant konstrukcji stalowej: Excon, a.s., Vladimír Janata, Dalibor Gregor

Architekt i koordynacja 3D: Roman Koucký Boudo architektonické s.r.o., R. Koucký, L. Kábrt

Projektant wysuwania, koordynator: NOVÁK and PARTNER, s.r.o., L. Vráblík, M. Šístek

Koordynator projektu Blanka: Satra a.s., Alexandr Butovič
Zarządca inwestycji: IDS a.s., Josef Kališek, Luděk Fuchs, Jiří Plachý

Wykonawca mostu: Metrostav a.s.

Kierownictwo projektu: Alexandr Tvřz, Zdeněk Račan, Petr Koukolík

Przygotowanie projektu: Robert Brož, Vladimír Hájek, Pavel Guňka

Eksperti: Jan L. Vitek, Miroslav Škaloud

Autor koncepcji: Petr Vitek

Wysuwanie mostu i montaż elementów: Metrostav a.s., Tomáš Wangler, Jiří Lukeš

Wykonawca konstrukcji stalowej: Metrostav a.s., Jindřich Hágel, Josef Olenič, Leoš Gurný, MCE Slaný a.s., Jan Svoboda, Vladan Michalík

Roboty geodezyjne: Metrostav a.s., Jakub Beneš, Martin Hanzl, CCE Praha, s.r.o., Jaroslav Pohan, Jiří Bouček

Dostawa, montaż i sprężanie wieszaków Macalloy: Tension systems, s.r.o., Jiří Schlossbauer

Dostawca betonu: TBG Metrostav a.s., s.r.o., Milada Mazurová, Robert Coufal

Deskowanie konstrukcji monolitycznych: Česká Doka bednicí technika, s.r.o.

Monitoring: PONTEX, s.r.o., Tomáš Mička, Tomáš Klir

Przekład: mgr Joanna Szprycha

Literatura

- [1] *The measurement of Scientific and Technological Activities, proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technical Innovation Data*. Wyd. pol. Komitet Badań Naukowych. Warszawa 1999.
- [2] Šašek L. et al.: *Projekt Trojského mostu*. Sborník 17. mezinárodního symposia Mosty 2012. Sekurkon 2012.
- [3] Vitek J.L. et al.: *Výstavba Trojského mostu v Praze*. Sborník 17. mezinárodního symposia Mosty 2012. Sekurkon 2012.
- [4] Hátle J.: *Výstavba Trojského mostu v Praze*. „Silnice a železnice“ 2012, číslo 2.
- [5] Gregor D. et al.: *New Troja Bridge in Prague – Concept and Structural Analysis of Steel Parts*. Steel Structures and Bridges 2012 – 23rd Czech and Slovak International Conference. „Procedia Engineering“ 2012, Vol. 40, pp. 131–136. A special issue. Ed. by J. Bujňák and J. Vičan.
- [6] Janata, V. et al.: *New Troja Bridge in Prague – Structural Solution of Steel Parts*. Steel Structures and Bridges 2012 – 23rd Czech and Slovak International Conference. „Procedia Engineering“ 2012, Vol. 40, pp. 159–164. A special issue. Ed. by J. Bujňák and J. Vičan.